基于 Matlab 的整流装置谐波分析

利用 Matlab 中的电力系统仿真工具箱对三相整流装置进行了建模和仿真。仿真结果表明，该模型能够较准确地模拟三相整流装置工作，适用于三相整流装置系统谐波电流研究。

谌贵辉　李红伟　赵万明　张培志/西南石油大学电子信息工程学院



谌贵辉



关键词/Keywords
Matlab ·
谐波 ·
整流装置 ·
仿真 ·

各种电力电子装置在电力系统、工业、交通及家庭中的应用日益广泛，加剧了对电网的污染，对通信设备和电子设备产生严重干扰，已成为阻碍电力电子自身发展的重大障碍。

随着各式各样的整流装置在各行各业中的广泛应用，可以说整流装置遍布电力系统的各个电压等级，成为电力系统的主要谐波源之一，因此，建立其电气系统的仿真模型，研究并解决整流装置对电力系统的谐波危害问题具有重要的理论和实际意义。

整流装置的电气系统模型

以大型整流装置——三相六脉动整流器为例，分析其在电力系统中的谐波问题。图 1 所示为三相可控整流的电气模型。

三相整流桥详细的整流过程分析与供电电流表达式非常复杂，从配电网使用谐波计算的角度看，详细的整流负荷谐波源模型并不是必需。所以，在进行整流负荷谐波分析时，可以只考虑影响谐波的主要因素（如换相重叠角和晶闸管触发延迟角等），而忽略影响谐波的次要因素。整流负荷的谐波电流可按下式计算

$$\frac{I_h}{I_1}=\frac{h}{2}\times\sqrt{\frac{\dfrac{\sin^2\left[(h+1)\frac{\gamma}{2}\right]}{(h+1)^2}+\dfrac{\sin^2\left[(h-1)\frac{\gamma}{2}\right]}{(h-1)^2}-\dfrac{2\sin\left[(h+1)\frac{\gamma}{2}\right]\sin\left[(h-1)\frac{\gamma}{2}\right]2\cos(2\alpha+\gamma)}{(h+1)(h-1)}}{\sin^2(2\alpha+\gamma)\sin^2\gamma+[\gamma-\cos(2\alpha+\gamma)\sin\gamma]^2}} \quad (1)$$

式中，I_h 为 h 次谐波电流；I_1 为整流变压器一次基波电流；α 为晶闸管触发延迟角；γ 为换相重叠角。

在式（1）中，对三相六脉动整流桥考虑 $6k\pm1$ 次谐波，$k=1,2,3,\cdots$。触发延迟角 α 在计算时为给定值，取值在 $0°\sim90°$ 之间，换相重叠角 γ 和基波电流 I_1 分别为

$$\gamma=\cos^{-1}\left[\cos\alpha-\frac{2I_dX_s}{\sqrt{6}U}\right]-\alpha \quad (2)$$

$$I_1=\frac{\sqrt{6}}{\pi K_1}I_d \quad (3)$$

式中，I_d 为整流桥直流侧电流；X_s 为整流变压器电抗；U 为整流变压器一次相电压；K_1 为整流变压器变比。

表 1 给出了根据以上理论计算出的六脉动整流器特征谐波电流的理论值和典型值。其中，理论值是在假定平波电抗器的等值电感 $L=\infty$、整流变压器的漏感及系统电感 $L_s=0$ 及触发延迟角 $\alpha=0$ 的情况下计算出来的特征谐波的电流值；典型值是在 $L_s\neq0$ 及触发延迟角 $\alpha\neq0$ 的情况下计算出来的特征谐波的电流值。

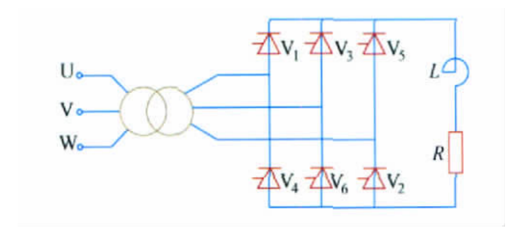


图 1　三相可控整流模型

西南石油大学自然科学基金资助（编号：2007XJZ112）。

表 1　三相六脉动整流器特征谐波电流数据

h	I_{h0}	I_h	h	I_{h0}	I_h
1	100	100	17	5.9	1.5
5	20	17.5	19	5.3	1.0
7	14.3	11.1	23	4.3	0.9
11	9.1	4.5	25	4.0	0.8
13	7.7	2.9			

特征谐波分量的幅值受到电感、触发延迟角和换相角的影响。因此，国际大电网会议（CIGRE）36—05 工作组建议采用根据整流器的谐波电流波谱的有关数据，得到某些特征谐波电流幅值和谐波次数的近似关系为式 $I_h = I_1/1.2(h-5/h)$，谐波电流的次数为 5～31 次。

整流装置的电气系统仿真

1. Matlab/Simulink 模型

在 Matlab/Simulink 环境下建立整流装置的电气系统仿真模型。其中假定平波电抗器的等值电感 $L=\infty$、整流变压器的漏感及系统电感 L_s 及触发延迟角 α 可调。

2. 仿真结果

图 2 所示为三相桥式整流电路在平波电抗器的等值电感 $L=\infty$、触发延迟角 $\alpha=60°$时的 A 相电流波形。图 3 为三相桥式整流电路的 A 相电流频谱图。表 2 为三相桥式整流电路 A 相电流谐波含量表。

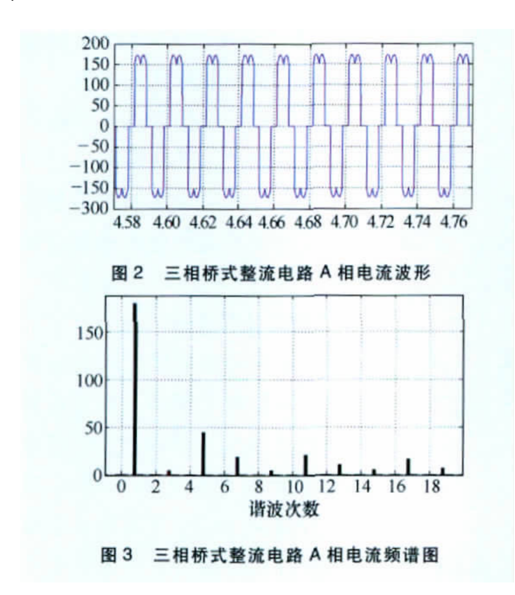


图 2　三相桥式整流电路 A 相电流波形

图 3　三相桥式整流电路 A 相电流频谱图

表 2　三相桥式整流电路 A 相电流谐波含量表

谐波次数	谐波含量	谐波次数	谐波含量
0	0	11	0.122 2
1	1	12	0
2	0	13	0.066 7
3	0.038 8	14	0
4	0	15	0.044 4
5	0.25	16	0
6	0	17	0.105 5
7	0.111 1	18	0
8	0	19	0.055 6
9	0.05	20	0
10	0		

由以上仿真结果可以看出，电流中主要含有基波、5 次、7 次、11 次、13 次和 17 次等各次谐波，表 2 中各次谐波含量和用理论推导出的谐波含量（见表 1）相符，且特征谐波电流幅值和谐波次数的近似关系也与式 $I_h = I_1/1.2(h-5/h)$ 基本一致，说明本文所建立的仿真模型及仿真结果正确。整流负荷在实际运行中除产生特征谐波外，还产生非特征谐波，即谐波次数不是 $6k\pm1$ 次的谐波电流，如对于三相六脉动整流桥，产生 3 次、9 次和 15 次等非特征谐波。非特征谐波是由于整流设备触发延迟角不均匀、供电电压不平衡、系统三相阻抗不对称及负荷波动等因素引起的，其谐波次数不能像特征谐波那样由脉动数来决定。非特征谐波电流的计算比较复杂，而且许多因素和参数难以确定，所以非特征谐波一般采用估计的方法。

结束语

本文提出的三相整流装置的 Matlab/Simulink 模型是在简化换相重叠角 γ 的基础上，根据整流装置系统实际运行环境建立的，该模型具有易于实现、灵活方便、仿真范围广和仿真速度快的优点，并且可以使用 FFT 分析器对任意线路进行在线谐波分析。

（收稿日期：2008－04－21） EA